

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Карташов В.М., Бабкин С.И., Волох А.В., Пащенко С.В., Яценко П.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14

Тел. (057) 70-21-587, e-mail: res@kture.kharkov.ua

The analysis of a current status of theory and practice of radio-acoustic sounding systems (RASS), which have been under development since 1961 for remote sensing the profiles of vertical air temperature and humidity and wind velocity and direction, is made. A traditional construction scheme of the RASS, as implemented in practically all known systems, is singled out. Methods used for radio-acoustic atmosphere sounding for the purpose of collecting relevant meteorological information are examined. It's pointed out that all problems of system, technical nature, arising in the course of development of the RASS, were resolved before 2000 by engineering, experimental way. Later on creation of the RASS theory started, and problems of synthesis and optimization of systems, devices, signals were formulated. In this connection an adequate constructive model of a radio-acoustic location channel and synthesized signal processing algorithms are under examination.

1. Введение. В настоящее время системы радиоакустического зондирования (РАЗ) позволяют дистанционно определять основные метеорологические величины (температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра) и являются перспективным средством метеонаблюдений. Несовершенство станций РАЗ, находящихся в эксплуатации, обусловлено недостаточным уровнем развития теории систем РАЗ и методического обеспечения деятельности инженеров-разработчиков. Характерные особенности таких систем в сравнении с другими разнообразными локационными системами обусловлены, прежде всего, уникальностью рассеивающего объема – акустического волнового пакета, на котором наблюдается рассеяние радиоволн. Именно вследствие особенностей объема рассеяния существующие методы синтеза и анализа радиосистем и устройств не востребованы в достаточной мере при проектировании и оптимизации станций РАЗ.

2. Анализ структуры систем РАЗ. В первых системах РАЗ использовались импульсные радио и акустические сигналы и строились они по моностатической схеме, в которой фазовые центры всех антенн совмещены в одной точке. В большинстве последующих систем РАЗ применялось импульсное акустическое излучение и непрерывное монохроматическое радиоизлучение, использовались отдельные, разнесенные на некоторое расстояние, передающая и приемная радиоантенны. Акустическая антенна, как правило, располагается посередине между радиоантеннами. Такая схема расположения антенн в совокупности с указанной выше комбинацией зондирующих радио и акустического сигналов (схема построения системы) получила название <<основной>>. К середине 80-х годов прошлого столетия, когда, в основном, сформировались принцип построения и структура доплеровской системы РАЗ, в мире насчитывалось около 10 работающих установок, большинство из которых были построены по основной схеме [1]. Некоторые структурные особенности имеет установка РАЗ-10, разработанная в Харьковском институте радиоэлектроники (ныне ХНУРЭ) [2]. Здесь радио и акустическая антенны размещаются так же, как и в основной схеме, только на вращающейся платформе, а акустическая антенна, кроме того, может перемещаться в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей центры радиоантенн. Сделано это с целью компенсации в небольших пределах ветрового переноса звукового пакета. Если ранее (в 70-80-е годы) большинство систем РАЗ разрабатывалось группами экспериментаторов и изготавливалось в единичных экземплярах, то позднее (наряду с уникальными, единичными разработками) был начат также мелкосерийный выпуск подобных станций.

Радиоканал систем РАЗ реализуется по схеме <<истинной когерентности>>, когда выходной сигнал радиопередатчика и все гетеродинирующие напряжения приемника формируются от одного высокостабильного задающего генератора путем умножения его

частоты в необходимое число раз.. Такая схема построения позволяет при использовании задающего генератора, обладающего достаточной кратковременной стабильностью частоты, получать необходимую точность оценок скорости звука в атмосфере. Измеритель доплеровской частоты может быть реализован в аналоговом или цифровом виде. ЭВМ выполняет функции синхронизации, управления и адаптации, а также обработки результатов измерений. Особенность систем РАЗ состоит в необходимости выполнения условия Брэгга, которая диктуется как энергетическими, так и информационными соображениями. При использовании простых акустического и электромагнитного зондирующих сигналов изменение с высотой температуры и радиальной скорости ветра приводит к нарушению соотношения Брэгга. Достаточно сильный отраженный сигнал существует только в некотором диапазоне высот, при этом чем больше длительность акустического импульса, тем меньше этот диапазон [1]. Настройка на условие Брэгга при больших градиентах температуры для каждой из точек профиля («площадок») вручную путем изменения частоты излучаемого звукового сигнала занимает достаточно много времени, которое в зависимости от количества точек профиля может составлять 0,1- 3 часа [1,2]. Используемый алгоритм измерений значительно ограничивает оперативность получения профилей метеовеличин – качество, являющееся одним из основных достоинств метода РАЗ. Кроме того, такое время соизмеримо со временем квазистационарности процессов в атмосфере, в течение которого можно производить осреднение. В связи с изложенным, с самого начала развития метода РАЗ стали делаться попытки получения профилей «по одной посылке» [1], с установкой частоты акустического генератора для начала, середины и конца всей трассы [2], однако достаточный для уверенной регистрации уровень сигнала даже при благоприятных метеоусловиях удается получить только для нескольких соседних точек профиля. Нарушение условия Брэгга в крайних точках, в которых удается зарегистрировать сигнал, приводит к появлению погрешностей в определении температуры порядка 0,5-1,0 °С [1]. Такая погрешность не превышает случайных погрешностей радиозондов, но оказывается коррелированной с градиентом скорости звука, причем градиент всегда занижается по абсолютному значению. И хотя общее время измерения температурного профиля по такой методике значительно уменьшается, однако появляется случайная погрешность, которая не может быть уменьшена осреднением и коррекцией результатов измерений. Кардинальным решением вопроса о повышении оперативности РАЗ и точности измерения метеовеличин может стать подстройка частоты электромагнитного излучения под условие Брэгга по мере распространения простого акустического импульса в атмосфере. Разработке таких способов посвящены публикации [1,3] и другие. Поскольку обеспечить выполнение условия Брэгга во всем диапазоне изменения акустических длин волн с помощью подстройки частоты радиосигнала не предоставляется возможным, то медленные (сезонные и суточные) изменения метеовеличин целесообразно компенсировать подстройкой частоты звукового генератора. Такая периодическая подстройка частоты звука может быть выполнена по результатам прямых измерений температуры и скорости ветра у поверхности земли (автоматически или оператором). Компенсацию быстрых изменений длины акустической волны (в течение времени распространения акустического пакета по трассе зондирования) необходимо производить изменением частоты радиоизлучения. Однако сведения об успешной реализации подобных процедур на практике отсутствуют, что объясняется технической сложностью задачи, с одной стороны, и несовершенством алгоритмов управления частотами зондирующих сигналов – с другой. В системах РАЗ могут применяться дискретные приемные радиоантенны, в том числе и значительных размеров при зондировании до больших высот. Для эффективного использования апертуры решетки передающие электромагнитная и акустическая антенны могут в этом случае перемещаться при изменении метеоусловий, занимая положение с наветренной стороны, либо используется некоторое количество передающих антенн, которые перемещаются [4]. Разработаны и соответствующие алгоритмы обработки сигналов для такой схемы [4], позволяющие, в частности, оценивать координаты центра пятна рассеянных сигналов, перемещающегося в процессе измерений по апертуре решетки.

3. Инженерный подход к проектированию систем РАЗ. Отметим, что все вопросы системного, технического характера, возникающие при разработке систем РАЗ, решались до 2000 года инженерным, экспериментальным путем. После прихода к <<основной>> схеме построения таких установок усилия разработчиков были направлены на совершенствование различных элементов структуры. Рассматривались возможности использования различных видов антенн, акустических излучателей, радиоприемников, устройств выделения сигнала доплеровской частоты, схем и алгоритмов спектрального анализа. Достаточно удачная комбинация зондирующих сигналов, получившая широкое распространение на практике: импульсный акустический сигнал с синусоидальным заполнением и непрерывный монохроматический радиосигнал - также предложена инженерами. Ряд публикаций научного характера, например [5] и др., посвященных исследованию свойств некоторых типов зондирующих сигналов, появились позднее. Полученные в них результаты подтвердили правильность инженерной интуиции, подсказавшей использование данной комбинации сигналов, и несколько расширили представления о свойствах и возможностях других видов зондирующих колебаний. В упоминавшихся работах использовался достаточно сложный математический аппарат, затрудняющий восприятие излагаемого материала инженерами, занимающимися аппаратурой, и делающий проблематичным его развитие и рассмотрение других видов сигналов. Именно этими обстоятельствами объясняются ошибки и заблуждения, встречающиеся в упоминавшейся литературе, несмотря на высокую квалификацию авторов. О некоторых имевших место заблуждениях говорится также в работе [1]. В докладах ведущих ученых неоднократно высказывалась мнение о том, что разработка вопросов построения систем РАЗ практически завершена и происходит поворот к их практическому использованию. Таким образом, на определенном этапе развития в области разработки систем РАЗ атмосферы сложилась ситуация, когда основными методами проектирования являлись инженерная интуиция, основанная на опыте аналогичных и подобных решений в других областях, и эксперимент. Работы по созданию теории радиоакустических систем по существу не производились, задачи синтеза и оптимизации систем, устройств, сигналов не ставились. Вопросы же, связанные с проектированием аппаратуры, решались, в основном, путем заимствования известных решений из радиолокации с учетом метеоусловий и особенностей радиоакустического зондирования. Используемый подход в значительной степени предопределил достигнутые на определенном этапе успехи в развитии метода и систем РАЗ, однако же он и замедлил последующее развитие данного направления, поскольку далеко не все вопросы системного технического характера в этой области можно эффективно решить таким путем в силу специфики систем РАЗ.

4. Основные положения теории. Для создания эффективных систем РАЗ необходима глубокая теоретическая разработка соответствующих вопросов аппаратурного характера с использованием адекватных подходов, поскольку многие вопросы данного направления не содержатся в теории радиолокационных систем. Изложим кратко основные теоретические результаты, полученные в последнее время, прежде всего учеными Харьковского национального университета радиоэлектроники. Обнаружена закономерность в формировании рассеянного на звуке радиосигнала как взаимная автокорреляционная функция по дальности излучаемых электромагнитного и акустического колебаний. Закономерность вытекает из известных соотношений, полученных теоретическим путем, и подтверждается многочисленными экспериментальными результатами. Созданы адекватные конструктивные модели информационных каналов – радиоакустического и акустического. Введена двумерная взаимокорреляционная функция акустического и радиосигналов – функция рассеяния, теоретическим путем определены основные её свойства, выражающие наиболее общие характеристики рассеянных сигналов. Задача рассеяния электромагнитной волны на звуке представлена с помощью аппарата теории сигналов и функционального анализа, вследствие чего значительно повышается конструктивность рассмотрения. Функция рассеяния, <<вобрав>> в себя свойства среды взаимодействия и характеристики зондирующих акустического и электромагнитного колебаний, позволяет

достаточно просто находит вид рассеянного сигнала, соответствующий разнообразным условиям. Благодаря этому открываются широкие возможности для исследования различных видов зондирующих колебаний и развития теории рассматриваемых систем в целом. Разработаны методы исследования зондирующих акустических и электромагнитных сигналов. Представление функции рассеяния в различных математических формах и графически в виде поверхностей – тел рассеяния позволяет, используя различные виды сечений тел, осуществлять эффективный анализ зондирующих векторных радиоакустических сигналов. Изучены виды сигналов – наиболее часто используемые на практике и перспективные. Показано, что применяемые в настоящее время в радиоакустических системах алгоритмы обработки принимаемых сигналов, заимствованные из радиолокации, не адекватны процессам, происходящим в радиоакустическом локационном канале, поскольку не учитывают изменение структуры сигнала при рассеянии на звуковой посылке. Это приводит к существенному ухудшению показателей качества станций, в частности точности измерения температуры (погрешность может достигать единиц градусов). Для получения оценок максимального правдоподобия измеряемого параметра опорные сигналы в различных точках диапазона возможных значений данного параметра должны отличаться видом, формой а не являться копией излучаемого радиосигнала, как это принято. Формы опорных колебаний многоканального устройства обработки следует определять с помощью функции рассеяния, отображающей особенности преобразования в канале. Синтезированные алгоритмы обработки сигналов можно рассматривать как обобщение результатов теории радиосистем на случай, когда форма сигнала при рассеянии преобразуется по детерминированному закону. Если рассеивающий объем вырождается в точечную цель, то принимаемый и опорный сигналы становятся копией зондирующего, излучаемого радиосигнала. Предложенные процедуры обработки сигнала сводятся в этом случае к известным ранее алгоритмам оценивания параметров колебания.

Выводы. Состояние станций РАЗ атмосферы, находящихся в эксплуатации, не удовлетворяет современным требованиям практики метеонаблюдений, в связи с чем требуется существенное улучшение их основных показателей качества. Имеющиеся положение обусловлено тем, что проектирование аппаратуры осуществлялось, как правило, на основе заимствования известных решений из других областей. Построение более совершенных систем РАЗ требует создания моделей и методов описания и исследования взаимодействия зондирующих сигналов со средой и решения на их основе теоретических и практических задач по оптимизации систем данного класса.

Литература

1. Каллистратова М. А., Кон. А. И Радиоакустическое зондирование атмосферы. 1985. М.: Наука- 196 с.
2. Бабкин С. И., Куценко В. И., Пахомов Ю. А. и др. Система радиоакустического зондирования атмосферы сантиметрового диапазона волн// 5 Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тез.докл.,ч.3. 1978. Томск: ТФСО АН СССР- С.143-146.
3. Vogt S. Advantes in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies// 1996. Proc.of ISARS'96. Moscow. P. 37- 50.
4. Карташов В. М. Особенности обработки радиосигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом//1998. Радиотехника (Харьков) №105. С. 75-79.
5. Гурвич А. С., Кон А. И., Налбандян О. Г. и др Методы радиоакустического зондирования атмосферы. 1976 Препр. ИФА АН СССР -М.: Наука.- 43 с.